



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Surgimiento de subcentros económicos, un análisis computacional

Juan Diego Lobo Clavijo

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Económicas
Escuela de Economía
Bogotá D.C., Colombia
2019

Surgimiento de subcentros económicos, un análisis computacional

Juan Diego Lobo Clavijo

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ciencias Económicas

Director (a):

Ph.D., Gustavo Adolfo Junca Rodríguez

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Económicas

Escuela de Economía

Bogotá D.C., Colombia

2019

A mis padres, a Hernando Rodríguez y a aquellos que (in)conscientemente contribuyeron a la complejidad de una nueva idea.

Agradecimientos

Este trabajo es el resultado de dar nueva vida a una idea que existía y fue nutrida por conceptos en borrador, conversaciones de pasillo, cuestionamientos sobre lo escrito y la curiosidad por la exploración de perspectivas distintas sobre la realidad de un problema. Nada de esto habría sido posible sin el apoyo incondicional de mis padres. Cada palabra de aliento, motivación, consuelo o presión fue valiosa.

En segundo lugar, quiero agradecer al profesor Gustavo Junca por su apoyo y por asumir la gran responsabilidad de dirigir y guiar un trabajo con un enfoque particularmente diferenciado, así como al profesor Francesco Bogliacino por el esfuerzo, paciencia y buena voluntad en entender la idea detrás de los varios borradores que antecedieron a este trabajo. Sus aportes, siempre bienvenidos, fueron importantes en dar forma a este proyecto.

Por último, agradezco a mis compañeros de clase y de oficina en Planeación Nacional por sus aportes, cuyos comentarios, ideas y dudas me permitieron afinar este trabajo de grado.

Resumen

Este trabajo analiza desde una aproximación computacional de microsimulaciones las causas identificadas en la literatura para la formación de subcentros económicos en el área urbana de Bogotá, considerando la presencia de agentes heterogéneos. En línea con los hallazgos de estudios anteriores, se encuentra que el área urbana simulada de Bogotá contó con la existencia de nueve subcentros económicos los cuales responden a una estructura urbana policéntrica. Un segundo modelo construido encontró que los individuos tienden a concentrarse cerca de sus sitios de trabajo, así el espacio habitacional se encarezca y sea más reducido que en otras posibles ubicaciones.

Palabras clave: geografía económica, economía urbana, ciudad policéntrica, área urbana de Bogotá, modelos basados en agentes, microsimulación de comportamiento descentralizado.

Abstract

This article analyses the identified causes for the emergence of economic subcentres in the Bogota urban area from a series of microsimulations, considering the presence of heterogeneous agents. Consistent with findings from previous works on the subject, a first model indicates that the Bogota's urban area is comprised by nine economic subcentres, which make up a polycentric city. A second model found that income-differentiated agents tend to locate next to their workplaces, even if facing higher living costs and reduced living areas.

Keywords: economic geography, urban economics, polycentric city, Bogota urban area, agent-based models, decentralized behaviour microsimulation

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras	1
Lista de tablas	1
Introducción	2
1. Estructura del estudio	5
2. Marco Teórico	5
2.1 Configuración Urbana Endógena.....	5
2.2 Del monocentrismo al policentrismo	6
2.3 Crecimiento urbano desordenado (urban sprawl)	10
3. Metodología.....	11
3.1 Modelos basados en agentes	12
4. Comprobación de policentricidad para una Bogotá simulada	13
4.1 El modelo en detalle	14
4.2 Parámetros de calibración y condiciones iniciales del modelo	16
4.3 Resultados de las simulaciones.....	17
5. Identificación de los determinantes de la estructura urbana	20
5.1 Ambiente inicial del modelo.....	21
5.2 Características de los agentes y reglas de comportamiento.....	22
5.3 Resultados de la simulación.....	25
6. Conclusiones	27
Bibliografía	31

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Efecto de la presencia de un agente sobre el precio y calidad en el espacio ...	16
Figura 2. Resultados para calidad y precios de las ubicaciones espaciales.	17
Figura 3. Resultados de la simulación en distancia a centros de trabajo.	19
Figura 4. Espacio inicial del modelo de dos centros.....	22
Figura 5. Resultados para la distribución de agentes en los dos centros económicos	25
Figura 6. Evolución de la distancia, renta y área habitacional promedio de los agentes .	26
Figura 7. Relación entre distancia, renta y área habitacional de los agentes	27

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Parámetros de calibración del modelo de policentricidad	17
Tabla 2. Parámetros de calibración para el modelo de dos centros	24

Introducción

El estudio del crecimiento urbano ha recibido mayor atención desde que se habló de la existencia y funcionamiento de las economías de aglomeración y de la morfología de las ciudades. Los primeros desarrollos en este campo pueden atribuirse a Alonso (1964) y Berry (1967), aunque se destacan contribuciones anteriores como la de Marshall (1920). Las economías de aglomeración corresponden a aquellos beneficios (externalidades positivas) que se producen cuando las firmas y los individuos se concentran en ubicaciones espaciales particulares, las cuales pueden ser ciudades y los denominados clusters en ellas.

La fuerte concentración de actividades económicas en torno a una ubicación permite la emergencia de economías de aglomeración en un centro distrital de negocios. Como contrapeso de estas externalidades, factores como el incremento de los precios del suelo, entre otros, actúan como fuerzas de repulsión de la concentración espacial mencionada. Una ciudad en la que se tiene que este fenómeno ocurre tan sólo una vez es monocéntrica. Bajo este esquema, los precios del suelo y el costo de la vivienda (compra o arriendo, según el modelo aplicado) decrecen conforme crece la distancia respecto al centro distrital de negocios. De igual manera, los efectos positivos la aglomeración se diluyen al aumentar la distancia, dados unos costos de transporte.

La mayor parte de los modelos asociados a este fenómeno han sido documentados en la literatura de geografía económica, economía urbana y urbanismo, principalmente analizando casos en economías desarrolladas; los trabajos sobre las urbes en naciones en vía de desarrollo tales como China, India o Brasil son recientes (Avendaño (2008), Fernandez-Maldonado et. Al. (2008), Gonzales de Olarte & del Pozo (2012), Liu, Derruder & Wu (2016), McMillen & Smith (2003), Sinclair-Smith (2015), Zheng, Sun, Wu & Kahn (2015), Chauvin, Glaeser, Ma & Tobio (2016), etc.) y se diferencian al proponer explicaciones en las cuales la diferenciación de los contextos es evidente e importante.

Ahora bien, la ciudad de Bogotá cuenta con una historia de crecimiento particular, dadas sus condiciones geográficas y dinámica socioeconómica. El área urbana de esta capital ha crecido de manera que su expansión horizontal ha derivado en el pasado en la asimilación de municipios aledaños como Engativá, Suba y Usaquén. La ciudad está densamente

Introducción

poblada y presenta procesos de segregación social. La población con menores ingresos se concentra hacia el sur, el occidente y la periferia del centro distrital de negocios (Central Business District en inglés) (Bocarejo & Tafur, 2013). Este corresponde al centro económico de la ciudad, en el cual se concentra la mayor parte de la actividad económica. Aunque la infraestructura vial y los medios de transporte han avanzado debido al desarrollo de troncales para transporte masivo (Transmilenio) y al incremento de las vías pavimentadas, estudios como el de Bocarejo (2007) señalan que hay una fuerte carga de los costos de transporte a la población con menores recursos disponibles.

El Distrito Capital cuenta con una población cercana a los ocho millones y su área (de facto) metropolitana, alberga a cerca de diez millones de habitantes. Cabe aclarar que parte del crecimiento poblacional corresponde en gran medida a la constante entrada de desplazados por fenómenos de violencia nacionales, en búsqueda de mejores oportunidades.

Ahora bien, históricamente se han formulado planes de desarrollo de mediano y largo plazo, los cuales no han sido completamente adoptados o implementados, debido a los cambios de prioridades entre administraciones. Un factor constante de cara a dichos planes ha sido la urbanización ilegal, la cual ha tenido un efecto sustancial en el crecimiento de la ciudad (Bocarejo & Tafur, 2013). Ahora bien, es necesario precisar que el impulso al desarrollo de aglomeraciones en la ciudad inició con la intercesión presidencial durante el gobierno Rojas Pinilla. Los cambios introducidos además modificaron la estructura y territorios de los municipios conurbantes, introduciendo cambios significativos sobre el relacionamiento de la capital y los municipios vecinos.

Considerando la dinámica de una ciudad como Bogotá, es de gran importancia lograr capturar la información necesaria para poder realizar la planeación y ordenamiento territorial de forma adecuada. El crecimiento sin orden es uno de varios grandes problemas que afectan la calidad de vida de los ciudadanos puesto que una expansión desmedida compromete de forma tangible el bienestar de los ciudadanos, afecta las dinámicas al interior y en torno a los centros económicos y pone en riesgo la sostenibilidad del sistema urbano.

Atendiendo la necesidad de comprender de mejor manera la complejidad detrás de la morfología y dinámicas de la ciudad capital, no sólo basta con reconocer los procesos de transformación urbanos, es imperativo abordar y entender las posibles causas de la configuración de subcentros económicos y sus efectos sobre la morfología de la ciudad. En primer lugar, este trabajo se encargará de validar la policentricidad de Bogotá desde estudios realizados previamente y mediante una detenida revisión de literatura acerca de esta temática en particular. Posteriormente, se procederá a identificar algunos de los factores que contribuyen al surgimiento de subcentros económicos en la estructura urbana de la capital colombiana, partiendo de los hallazgos y contribuciones del primer ejercicio.

1. Estructura del estudio

El presente trabajo se encuentra organizado en cinco secciones. La primera sección realizó una introducción y delimitó la pregunta de investigación y objetivos principales. La segunda sección se ocupa de presentar el marco teórico del documento relacionado con geografía económica y morfología urbana. La tercera sección presenta la metodología aplicada en este documento para dar alcance y responder a la pregunta de investigación y objetivos definidos. La cuarta sección contiene el desarrollo y análisis de los resultados de los modelos de microsimulación empleados. Finalmente, la quinta y última sección contiene las principales conclusiones del presente trabajo.

2. Marco Teórico

Para poder realizar una aproximación general a la morfología de las áreas urbanas es necesario explorar una serie de conceptos que, o bien son centrales en el posterior desarrollo del problema de investigación planteado, o son conexos y merecen recibir un tratamiento similar de manera que la consistencia interna relacionada pueda ser verificada por cualquiera. Esta sección explorará literatura acerca de configuración urbana endógena (Grover & Lall (2015)), modelos monocéntricos y policéntricos de configuración urbana (Kulish, Richards, & Gillitzer (2011), Corcoran, (2014), Gómez-Antonio, Hortas-Rico, & Li (2016), Liu, Derudder, & Wu (2016), Avendaño (2008) y Gonzales de Olarte & del Pozo (2012)), y el crecimiento urbano desordenado (Gómez-Antonio, Hortas-Rico, & Li (2016) y Salvati & Carlucci (2016)).

2.1 Configuración Urbana Endógena

De acuerdo con Grover & Lall (2015), los procesos de aglomeración económica pueden producirse bajo varios escenarios. El primero de ellos indica que, si existe heterogeneidad en el espacio, podría darse una formación endógena de un centro distrital de negocios (CDN) debido a la ventaja comparativa entre posibles ubicaciones. Otra posible explicación está dada por los mercados con competencia imperfecta gracias a la generación de retornos crecientes agregados asociados a las ventajas de poder compartir una mayor variedad de insumos. Una tercera explicación involucra a las externalidades producto de

las interacciones entre agentes distintas a las de mercado, que influyen en la concentración espacial.

De manera general, las teorías sobre la aglomeración parten de suponer que existen beneficios derivados de la concentración espacial, los cuales se refuerzan entre sí. La aglomeración puede producirse entre agentes de uno o varios sectores económicos. Por ejemplo, un resultado derivado del fenómeno descrito puede ser el incremento de la productividad o de la capacidad de innovación de los agentes involucrados, dado que los costos de comunicación y desplazamiento son mínimos y que estos permiten compartir conocimiento más fácilmente.

El contrapeso directo y más general a las aglomeraciones es el gradiente de precios de la tierra, el cual actúa como fuerza de repulsión de los centros. De acuerdo con Grover & Lall (2015), una ciudad monocéntrica puede ser producto de la existencia de bajos costos de desplazamiento para los trabajadores mientras que una con varios centros económicos puede resultar de mayores costos de transporte y efectos de las des-economías de aglomeración en la urbe. Ahora bien, también se afirma que el acceso a capital humano calificado, suministro de insumos intermedios, infraestructura básica y a redes de telecomunicaciones son relevantes en la configuración espacial de las ciudades.

2.2 Del monocentrismo al policentrismo

En el modelo monocéntrico existen tres factores relevantes que explican la aglomeración en un espacio determinado. En un modelo como el Alonso-Mills-Muth (Kulish, Richards, & Gillitzer, 2011), el crecimiento poblacional, los aumentos en ingresos reales y los costos decrecientes de traslado a los sitios de trabajo son responsables del crecimiento espacial de las ciudades, dadas unas características de los hogares homogéneas.

Modificaciones al modelo inicial han incluido un “Tiebout sorting”, el cual modela la forma en que los individuos u hogares se distribuyen en vecindarios y comunidades, dada su disposición y capacidad para pagar por bienes públicos locales. Teóricamente hablando, esta repartición resulta en una provisión eficiente de bienes públicos (Corcoran, 2014). El modelo con esta modificación afirma que los individuos consideran sus preferencias y conforman comunidades homogéneas. De igual manera, las expectativas de los individuos

sobre el desarrollo urbano futuro condicionan su elección para habitar espacios actualmente destinados a otros fines (Gómez-Antonio, Hortas-Rico, & Li, 2016).

Complementando lo anterior, es necesario precisar que las dinámicas presentes no se limitan exclusivamente a una región delimitada administrativamente. La tendencia o impulso discrecional hacia las aglomeraciones de una ciudad también influencia la evolución de las poblaciones cercanas, denominadas como el hinterland de dicha población. El grupo de municipios conurbantes se relaciona con la ciudad correspondiente mediante la provisión de bienes y servicios complementarios, entre los que se puede encontrar la funcionalidad de municipalidad dormitorio. En este sentido, los análisis que se hagan también deben considerar como relevantes a estos municipios pues en mayor o menor medida pueden constituir parte activa del tejido policéntrico del espacio a estudiar.

Por otra parte, para definir el policentrismo de las áreas urbanas es necesario considerar elementos tales como la escala y el tipo de análisis del policentrismo (funcional o morfológico) (Liu, Derudder, & Wu, 2016). El policentrismo funcional alude a si se trata de analizar un contexto intra-urbano, inter-urbano o regional. Por su parte, el policentrismo morfológico busca diferenciar a la importancia relativa de las ciudades (morfológica)¹, de la importancia relativa de las ciudades en los procesos de integración regionales (funcional)². La importancia de un centro depende de la fortaleza de sus vínculos con otros centros cercanos, tanto dentro como fuera del espacio de análisis. Consecuentemente, una “región” es morfológicamente policéntrica si ellas existen varios centros económicos importantes.

Empíricamente, los nodos y su fortaleza pueden obtenerse de la construcción de matrices origen-destino a partir de la cantidad de conexiones entre ciudades por bus, tren o avión y la correspondiente periodicidad de viajes realizado por línea. Para hacer comparable la información es necesario aplicar transformaciones a cada capa de datos, de manera que los valores para las parejas de ciudades que se puedan encontrar no deriven en distribuciones sesgadas. Adicionalmente, trabajos como el de Liu, Derruder y Wu (2016)

¹ Este se mide mediante producción, tamaño de la población o cantidad de conexiones a redes de infraestructura.

² La medida de funcionalidad se realiza a partir de los flujos corporativos o de infraestructura.

recomiendan que los valores sean normalizados para dar cuenta de la conectividad de las redes de cada región considerada y consecuentemente de la policentricidad morfológica y funcional.

Independientemente de la identificación de la policentricidad de una ciudad o una región, McMillen & Smith (2003) infieren acerca del modelo de Fujita y Ogawa que la cantidad de sub-centros de equilibrio en la configuración urbana puede incrementar conforme lo hacen la población y los costos unitarios de traslado a los sitios de trabajo. En este sentido, también es necesario considerar que la morfología urbana es dinámica; una urbe monocéntrica puede transformarse con el tiempo en una policéntrica (Bertaud, 2003 en Grover & Lall, 2015). Conforme crecen las ciudades y la infraestructura vial y de comunicaciones, los terrenos de menores precios ubicados a cierta distancia de los CDN se tornan atractivos y dan pie al surgimiento de ciudades de segundo orden o a una estructura urbana policéntrica. Esto implica a su vez que en la medida que una ciudad se desarrolla, el gradiente de precios de tierras se torna menos negativo y que la bondad de ajuste de las estimaciones de modelos monocéntricos será progresivamente menor.

Al cambiar de estructura morfológica resulta importante establecer los criterios para poder identificar los distintos sub-centros urbanos que puedan existir en un área determinada. Para tal efecto, un sub-centro está definido como un área con densidad de empleos significativamente mayor a la de áreas vecinas. Dicho sub-centro además debería ser lo suficientemente grande como para tener un efecto significativo sobre la forma del área urbana, efecto visible en precios de la tierra y de las viviendas, y en la densidad de población. Para poder dar cuenta de lo anterior, la comprobación empírica se remite a métodos de “clustering” y modelos no paramétricos (Grover & Lall, 2015). Estrategias como las descritas ya se han aplicado a urbes en el mundo en vía de desarrollo, entre ellas a Bogotá en el estudio de McMillen & Smith (2003). En este caso, se identificaron 10 sub-centros en el área de la capital. Ahora bien, dichos modelos adolecen de un grado de arbitrariedad al determinar los valores límite empleados en los gradientes de densidad poblacional.

De acuerdo con Liu, Derudder & Wu (2016), generalmente para medir la policentricidad de las ciudades-región se elige una de las siguientes alternativas:

- Regresar a la importancia de varias ciudades en una región respecto a una distribución por tamaño jerarquizado.
- Comparar los niveles observados de policentricidad con los niveles esperados, producto de modelos de policentricidad pura aplicados.
- Emplear métodos de análisis de redes sociales.

La primera aproximación puede inducir resultados espurios si se trata con una muestra pequeña y heterogénea de ciudades o centros, y el segundo requiere de la inclusión de gran cantidad de información local, perdiéndose poder para poder generalizar las conclusiones.

El trabajo de estos autores analizó 22 áreas urbanas (321 ciudades) en China, para las cuales se estableció la cantidad de conexiones mediante la información existente sobre transporte multimodal (cantidad de líneas y periodicidad). Las medidas de las conexiones fueron transformadas mediante logaritmos para mitigar los efectos de distribuciones sesgadas y normalizadas. Este procedimiento permite determinar la centralidad interna y externa, tal que se puede concluir sobre la policentricidad morfológica y funcional. Este análisis encontró que la mayoría de las áreas urbanas policéntricas se concentran en la costa oriental china y que, aunque existen regiones urbanas morfológicamente policéntricas, estas pueden no ser funcionalmente policéntricas.

En Latinoamérica se han realizado estudios como el de Avendaño (2008), el cual encontró la existencia de 20 subcentros en la ciudad de Bogotá utilizando la metodología de Guiliano y Small (1991). Económicamente, este trabajo estimó la función de densidad de empleos, que depende de la distancia a los sub-centros identificados, y concluyó que el centro de Bogotá ha perdido peso como centro del área urbana. Para el caso de Lima, el trabajo de Gonzales de Olarte & del Pozo (2012) estimó un modelo en que la densidad bruta de empleo dependía de la distancia a cada uno de los centros identificados, cuya importancia está dada por la distancia al centro más lejano. Los autores señalan que son conscientes de la existencia de otras variables relevantes y controlaron por la longitud de las vías.

Es necesario mencionar que como alternativa a los modelos monocéntricos y policéntricos se han propuesto modelos de máximo desorden, en que las viviendas de los trabajadores

y sus sitios de trabajo se distribuyen de forma aleatoria en la ciudad; modelos de dispersión restringida, en que existe una serie de subcentros por fuera del CDN que atraen entre sí puestos de trabajo o a infraestructura y amenidades que comparten; y modelos de comunidades de vida-trabajo en que los trabajadores y las firmas se encuentran a una distancia que puede recorrerse a pie o en bicicleta (Grover & Lall, 2015).

2.3 Crecimiento urbano desordenado (urban sprawl)

En paralelo con los estudios sobre mono y policentricidad urbana, el crecimiento urbano desordenado ha sido tratado como un fenómeno asociado a los cambios morfológicos urbanos que puede confundirse con la transición hacia configuraciones espaciales distintas. Aunque no existe consenso al respecto, hay elementos comunes para entender a este fenómeno como un patrón de crecimiento urbano de baja densidad, disperso, discontinuo y auto-dependiente, generalmente ocurriendo en los extremos exteriores de las ciudades sin mayor planeación involucrada (Gómez-Antonio, Hortas-Rico, & Li, 2016). Aunque el objeto del estudio de Salvati & Carlucci (2016) fue estudiar las más importantes causas del crecimiento urbano desordenado en las ciudades italianas, los autores rescatan una aproximación que reconoce al problema como uno de complejidad en la interacción de los agentes involucrados y enumeran una serie de causas posibles:

- Composición de la economía urbana por sectores y reordenamiento espacial orientado hacia la dispersión.
- Cambios en la ubicación de las actividades económicas por cambios en los precios de la tierra.
- Cambios en ingresos personales y patrones de consumo.
- Infraestructura existente y accesibilidad.
- Estructura y dinámica del mercado laboral.
- Cambios demográficos y de los hogares.
- Procesos de migración y segregación.
- Cambios de estilo de vida y comportamientos.
- Regulación pública
- Mala calidad del contexto socio-ambiental.
- Viabilidad del sector agrícola.

Estos autores tomaron información georreferenciada acerca de los distintos usos de la tierra y emplearon herramientas de análisis de dichos datos para traslapar la información correspondiente a las fronteras municipales. Se tomó como punto de partida la definición de la variable dependiente empleada, la clasificación del uso de la tierra, para dar cuenta del aspecto denominado como “tejido urbano discontinuo”. A partir de lo anterior se agruparon las municipalidades según el porcentaje de tierras con dicha clasificación (baja difusión, difusión moderada y alta difusión). Adicionalmente se utilizó a la densidad de la población, porcentaje de área urbana y los porcentajes de tejido urbano continuo y discontinuo para caracterizar a las municipalidades. Los autores hallaron que la mayor parte del crecimiento urbano desordenado se ubicó en el norte italiano.

3. Metodología

De acuerdo con Capello (2013) se han identificado tres grandes paradigmas acerca de los estudios de morfología urbana (monocentricidad (Kulish, Richards, & Gillitzer, 2011), policentricidad (Fernandez-Maldonado, Romein, Verkoren, & Parente Paula Pessoa, 2014) y “urban sprawl” (Gómez-Antonio, Hortas-Rico, & Li, 2016)). Para este caso particular el enfoque que mejor ajuste guarda es el de la red urbana. Este paradigma maneja una aproximación tanto empírica como teórica, en que se concibe a una ciudad o a un centro como una parte especializada de un sistema interconectado. El análisis comprende un componente espacial, en que se considera la influencia de las economías de aglomeración, externalidades (tanto positivas como negativas) y la posible existencia de un equilibrio a nivel intra-urbano dado por las interacciones inter-urbanas.

Como fue mencionado anteriormente, las estructuras que caracterizan el desarrollo de los centros urbanos son dinámicas y por tanto deben considerarse los elementos catalizadores de cambios significativos. Como bien lo comenta el trabajo de De Goei, Burger, Van Oort & Kitson (2010), la flexibilidad y movilidad de las firmas y los hogares, junto con las políticas de planeación y ordenamiento territorial, pueden modificar la distribución espacial de los empleos y las residencias, derivando en estructuras distintas a la original, que bien podrían resultar en una forma híbrida de monocentricidad y policentricidad, marcando el paso de un patrón al otro.

3.1 Modelos basados en agentes

Una de las metodologías aplicadas para hacer un análisis de morfología urbana es la de modelos basados en agentes (agent-based models o ABM en inglés). Estos parten del modelamiento computacional del comportamiento e interacciones de agentes heterogéneos a partir de reglas de comportamiento establecidas previamente, analizando los efectos sobre un sistema en su totalidad. Considerando que pueden existir distintos tipos de agentes y que estos no siempre cuentan con información completa (la información de la que dispone un agente puede cambiar en el tiempo), se trabaja sobre un modelo que no depende de la lógica de agentes representativos y sólo motivados por su propio bienestar. Los agentes actúan de forma independiente según sus reglas de comportamiento y los modelos no exigen que se produzca una convergencia a un equilibrio o que en efecto exista uno. Adicionalmente, es posible incluir información sobre la geografía en que existen los agentes de manera que se pueda modelar de forma más compleja (Fontaine & Rounsevell, 2009).

Los modelos basados en agentes utilizan grandes cantidades de individuos y la información de la que disponen se actualiza de acuerdo con reglas específicas para periodos determinados. Según sea el comportamiento de los agentes, es posible generar predicciones a partir de la nueva información que la microsimulación genera. Los sistemas de ecuaciones diferenciales pueden ser indicativos de causalidad entre variables, mas no representar a los agentes en sí (Ayaragamchanakul , 2014).

A diferencia de la aproximación de autómatas celulares, la cual se basa en el modelamiento de unidades espaciales uniformes con funciones de comportamiento estrictamente vinculadas al ámbito espacial, los modelos basados en agentes permiten modelar aspectos geográficos y económicos. La gran ventaja del modelamiento mediante este método es su facilidad para representar la toma de decisiones de individuos de forma independiente, descentralizada y diferenciada, sin exigir que se produzca una convergencia hacia un equilibrio. Dicho equilibrio puede producirse de forma autónoma sin restringir el desarrollo de las microsimulaciones.

4. Comprobación de policentricidad para una Bogotá simulada

El modelo de Wilensky (2007) que aquí se adapta, parte de modelar el uso residencial de la tierra a partir de las preferencias de dos tipos de individuos, los cuales se diferencian por el nivel de ingresos que perciben. Al modelar las dos poblaciones de agentes se consideran tres aspectos para que se establezcan en una ubicación dada: la calidad percibida de la ubicación, el costo de vida y la proximidad a los sitios de trabajo. El peso de estos criterios puede variar dependiendo de dónde se establezcan los agentes y el tipo de agentes asentados. Como consecuencia de la dinámica del modelo, se puede evidenciar la aparición de aglomeraciones en torno a los sitios de trabajo y la segregación espacial de agentes según sus ingresos.

Así como en la vida real, los sitios de trabajo que pueden aparecer y desaparecer en el tiempo. Cuando un nuevo sitio de empleo aparece, lo hace de forma aleatoria tras evaluar una determinada cantidad de potenciales ubicaciones, evaluando cuál es la más cara. La lógica de elegir la ubicación más cara implica que en dicho espacio hay agentes con alta capacidad de consumo y por lo tanto es deseable que un negocio se establezca cerca de donde pueda captar más recursos de los agentes.

Los individuos pueden elegir si permanecen en una ubicación o si se mueven, dependiendo de la distancia a los sitios de empleo, el costo de vida y la calidad de otras posibles ubicaciones para vivir. Las personas de bajos ingresos están denotadas por cuadros azules y las de alto ingreso por cuadros rosados. Estos últimos agentes van a preferir ubicarse cerca de los sitios de empleo, dando prelación a la calidad de la ubicación sin importar el precio, mientras que los de bajo ingreso buscan ubicaciones cuyo precio sea bajo, en lo posible, cerca de los sitios de trabajo.

El paso del tiempo está marcado por “ticks” en NetLogo (plataforma para el modelamiento de ABM), que no son otra cosa más que periodos de tiempo arbitrariamente definidos. En cada periodo aparecen nuevos agentes de alto y bajo ingreso, los cuales ingresan aleatoriamente al espacio y eligen una ubicación para habitar en la medida que esta maximiza su utilidad, la cual está dada por funciones hedonistas.

La presencia de un agente en una ubicación determinada tiene un efecto. Para el caso de los individuos de alto ingreso, estos provocan que el precio y la calidad de la ubicación aumenten, mientras que los individuos de bajo ingreso generan lo contrario. Los atributos de las ubicaciones circundantes también se ven afectadas y dicho efecto disminuye en la medida que crece la distancia respecto a ese punto original.

4.1 El modelo en detalle

El modelo adaptado del propuesto por Wilensky (2007) considera la cantidad de residentes por sitio de trabajo y la frecuencia con que aparecen nuevos sitios de empleo. Al inicio de la simulación sólo hay un sitio de trabajo, pero con el paso del tiempo es posible que más aparezcan en el espacio, el cual consta de una cuadrícula de 89x89 celdas. La máxima cantidad de sitios de empleo depende del parámetro asignado en la calibración inicial, el cual está en un rango entre 5 y 20. A su vez, por cada sitio de empleo hay una cantidad máxima permitida de trabajadores, también determinada al momento de realizar la calibración de parámetros que se encuentra en el intervalo de 0 a 500 agentes.

Por defecto, al comienzo del modelo existen cinco individuos de ingresos altos y cinco de bajos. Los nuevos individuos por periodo ingresan al modelo de acuerdo con un parámetro determinado en la calibración para cada tipo de agente (este parámetro está en un intervalo que va de 0 a 15 personas por periodo). Por otra parte, la desaparición de agentes está dada por la introducción de una tasa de salida (que está en un intervalo que va de 0 a 15 individuos por periodo), la cual implica la salida de agentes del espacio analizado por motivos de migración o fin de su ciclo de vida. Los agentes que desaparecen son aquellos que más tiempo llevan en el modelo.

Las preferencias de los individuos de bajos ingresos están dadas por la distancia a los sitios de trabajo y el precio de la ubicación en que se asientan. Los agentes de bajos ingresos cuentan la siguiente función de utilidad:

$$U(d, p)_{\text{ingreso bajo}} = \left[\frac{1}{\left(\frac{d}{100 + 0.1} \right)} \right]^{1-\alpha} \cdot \left(\frac{1}{p} \right)^{1+\alpha} ; p \in [1, 100]; \alpha \in [-1, 1]$$

donde

d : distancia mínima a sitio de trabajo

p : precio de la ubicación

α : criterio de prioridad de precio

Una prioridad sobre precios de los agentes de bajos ingresos de -1 implica entonces que a estos los tiene sin cuidado el precio al elegir una ubicación para habitar y solo le importa la distancia respecto al sitio de trabajo; un valor de 0 implica un balance de la importancia de ambos criterios; y un valor de 1 que sólo el precio importa al elegir una ubicación para ocupar.

De forma similar a lo visto con individuos de bajos ingresos, las preferencias de los individuos de altos ingresos están dadas por la distancia a los sitios de trabajo y la calidad de la ubicación habitacional. Ahora bien, los agentes de ingresos altos cuentan la siguiente función de utilidad:

$$U(d, q)_{\text{ingreso alto}} = \left[\frac{1}{(d + 0.1)} \right]^{1-\beta} \cdot (q)^{1+\beta}; \quad q \in [1, 100]; \quad \beta \in [-1, 1]$$

donde

d : distancia mínima a sitio de trabajo

q : calidad de la ubicación

β : criterio de prioridad de calidad

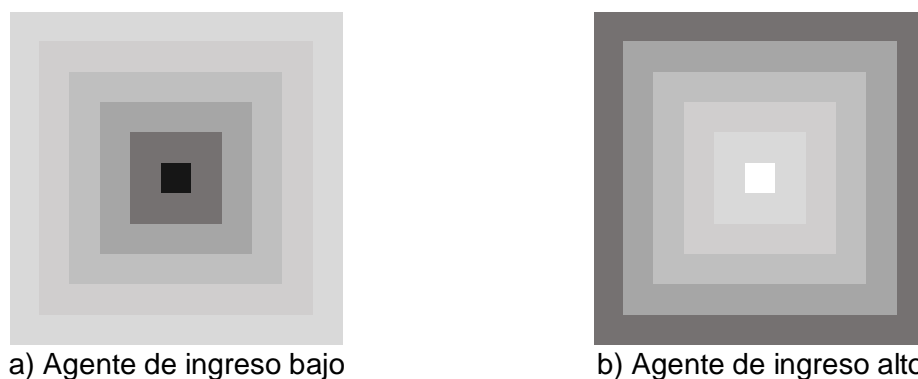
Una prioridad por calidad con un valor de -1 implica que a individuos de alto ingreso sólo les interesa vivir cerca de sus sitios de trabajo, mientras que un valor de 1 significa que sólo se le da importancia a la calidad de la ubicación de la vivienda. De nuevo, un valor de cero implica que se les da la misma importancia a ambos criterios.

Finalmente, la presencia de los agentes de ingresos bajos y altos tiene un efecto sobre los atributos de las ubicaciones que ocupan (precio y calidad). Dicho efecto no se limita exclusivamente al espacio en el que se encuentran, sino que también influye sobre las ubicaciones circundantes. El máximo radio de influencia es de cinco celdas. Así las cosas, los individuos de bajos ingresos hacen que la calidad y precio de la celda que ocupan decrezca en un 5% por periodo. El efecto sobre los atributos del vecindario de la celda

decrece a una tasa de 1% por unidad de distancia respecto a la celda de referencia. En contraposición, los individuos de ingresos altos incrementan el precio y calidad de la celda que ocupan en un 5% por periodo de tiempo y el efecto sobre su vecindario decrece a un 1% por unidad de distancia respecto a la celda de referencia central (

Figura 1).

Figura 1. Efecto de la presencia de un agente sobre el precio y calidad en el espacio



Fuente: Elaboración propia.

4.2 Parámetros de calibración y condiciones iniciales del modelo

La tasa de mortalidad no fetal de la ciudad de Bogotá ha presentado una tendencia decreciente para los últimos quinquenios, lo cual ha contribuido a la expansión de su población. Si se suma a lo anterior un comportamiento similar de la tasa neta de migración hacia la ciudad, puede aseverarse que la tasa de crecimiento poblacional sigue siendo positiva, a pesar de venir ralentizándose (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2011). Ahora bien, complementando lo anterior, un 51,7% de la población del distrito capital se encuentra concentrada en los dos estratos socioeconómicos más bajos (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2015).

Por otra parte, es necesario tener presente las condiciones bajo las cuales los individuos buscan vivienda. Para tal efecto, el estudio de Clavijo (2004) encontró para Bogotá unos valores para las elasticidades precio e ingreso para la demanda de vivienda de 1.8 y 1.5. Si se supone que el ingreso está relacionado de cerca con la calidad de la vivienda que un agente puede buscar, se puede tomar dicho valor como indicativo de calidad al seleccionar

una ubicación habitacional determinada. Por último, si se considera el desarrollo histórico de la ciudad de Bogotá, este ha sido caracterizado por carecer de una línea claramente establecida que determine la morfología urbana desde planeación distrital. En respuesta a esto y a los precios de la vivienda, los individuos tienen incentivos a realizar una búsqueda en múltiples ubicaciones antes de asentarse.

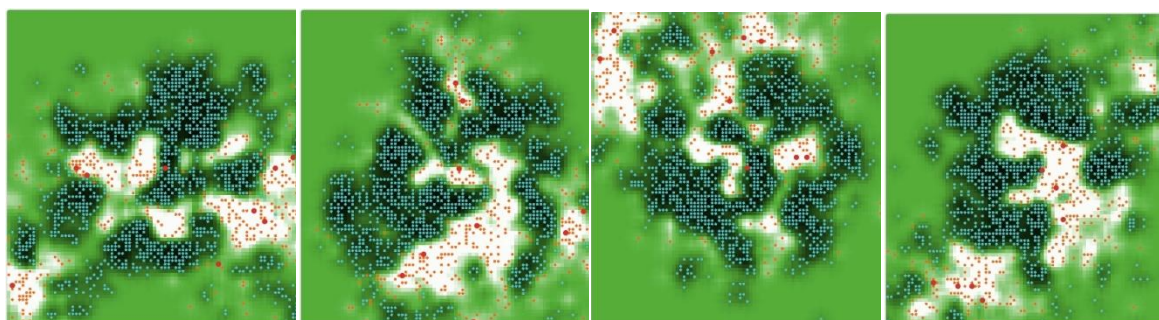
Tabla 1. Parámetros de calibración del modelo de policentricidad

Variable	Valor
Número de ubicaciones potenciales evaluadas	10
Individuos por sitio de empleo	300
Cantidad máxima de sitios de empleo	20
Tasa de salida de agentes	2
Prioridad de criterio de precio	0.8
Prioridad de criterio de calidad	0.5
Nuevos individuos de ingreso bajo por periodo	6
Nuevos individuos de ingreso alto por periodo	3

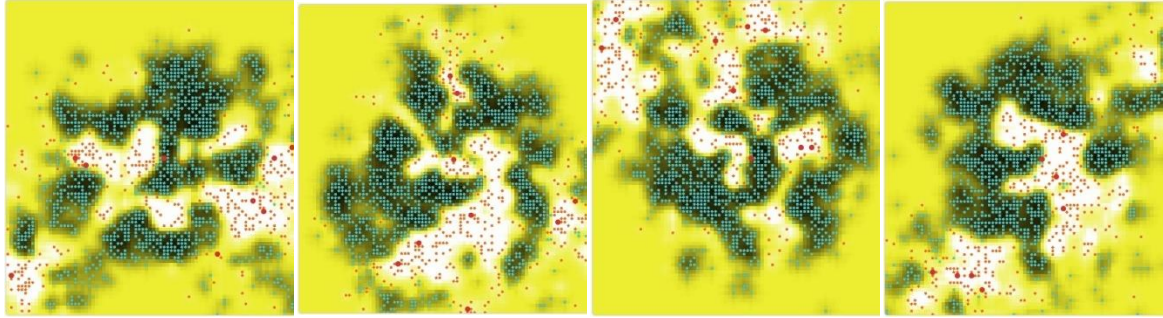
4.3 Resultados de las simulaciones

A partir de la anterior calibración del modelo, se realizaron una serie de iteraciones con los mismos parámetros base, los cuales derivaron en los siguientes escenarios tras el paso de 300 periodos, considerando que cada “tick” corresponde a un trimestre y el tiempo total simulado es de 75 años. De forma general se evidencia que los individuos se aglomeran según su nivel de ingreso en áreas determinadas, sin dar mayores indicios de un patrón dominante de organización espacial desordenada (sprawl). Adicionalmente, se evidencia que, aunque los sitios de trabajo reciben a todo tipo de individuos, las aglomeraciones en torno a estos evidencian una clara segregación espacial de agentes.

Figura 2. Resultados para calidad y precios de las ubicaciones espaciales.



a) Primer escenario – b) Segundo escenario – c) Tercer escenario – d) Cuarto escenario –
Visualización de calidad Visualización de calidad Visualización de calidad Visualización de calidad

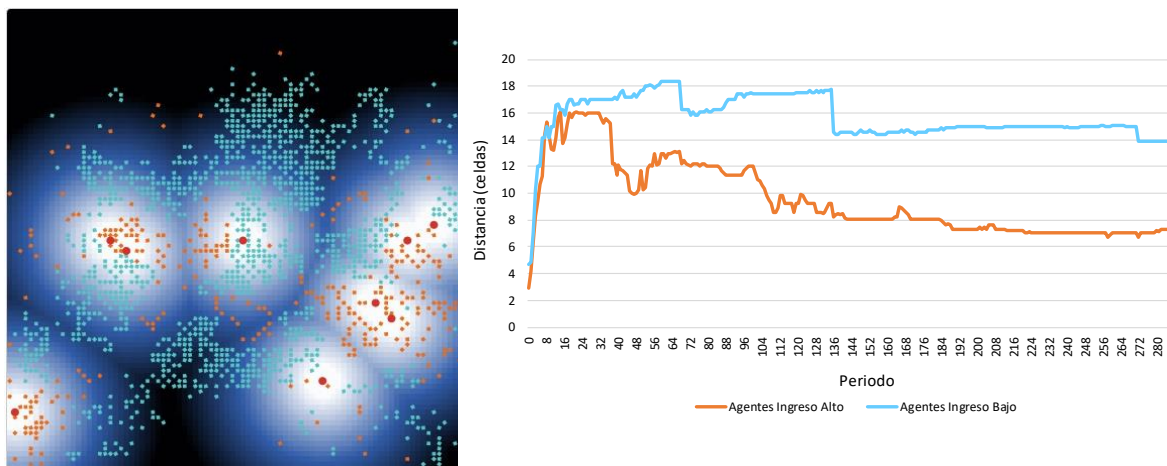


e) Primer escenario – f) Segundo escenario – g) Tercer escenario – h) Cuarto escenario –
Visualización de precio Visualización de precio Visualización de precio Visualización de precio

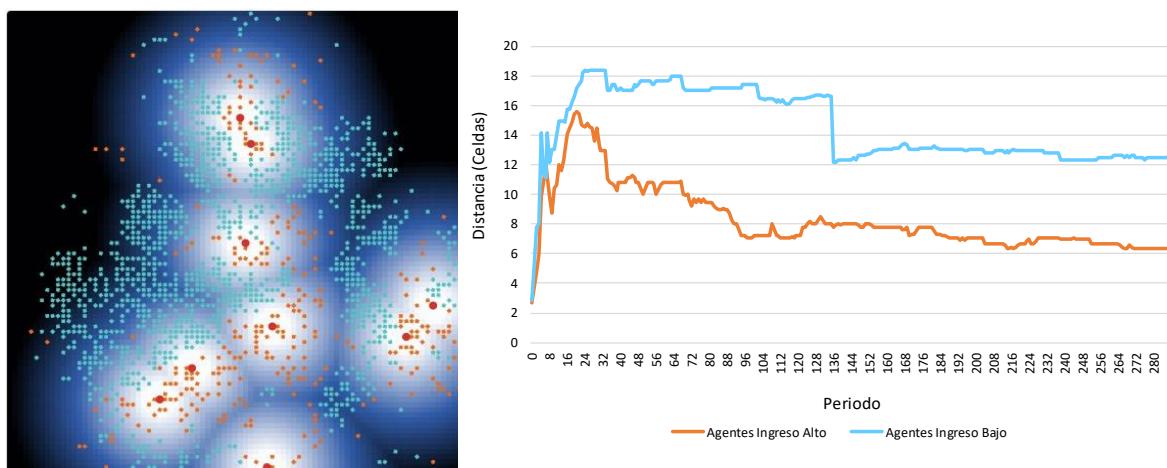
Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los resultados en precio y calidad de las ubicaciones, se evidencia que las aglomeraciones generadas de agentes de alto y bajo nivel de ingreso son marcadas, denotando una segregación espacial. Ahora bien, dichas concentraciones no implican necesariamente que sólo determinado tipo de individuos se vayan a asentar cerca de un sitio de empleo. Es posible ver casos en los cuales hay agentes de bajo ingreso cerca de dichos sitios, así como agentes de altos ingresos. Para los cuatro casos se evidenció que la distancia que debían recorrer los agentes para llegar a los sitios de empleo decreció progresivamente en la medida que la cantidad de centros aumentó. De hecho, se observó que, aunque el máximo de posibles centros correspondía al máximo de las centralidades identificadas por Avendaño (2008) en el POT de la ciudad, la cantidad de los surgidos producto de las simulaciones coincidió con las nueve centralidades cuyo signo fue el esperado.

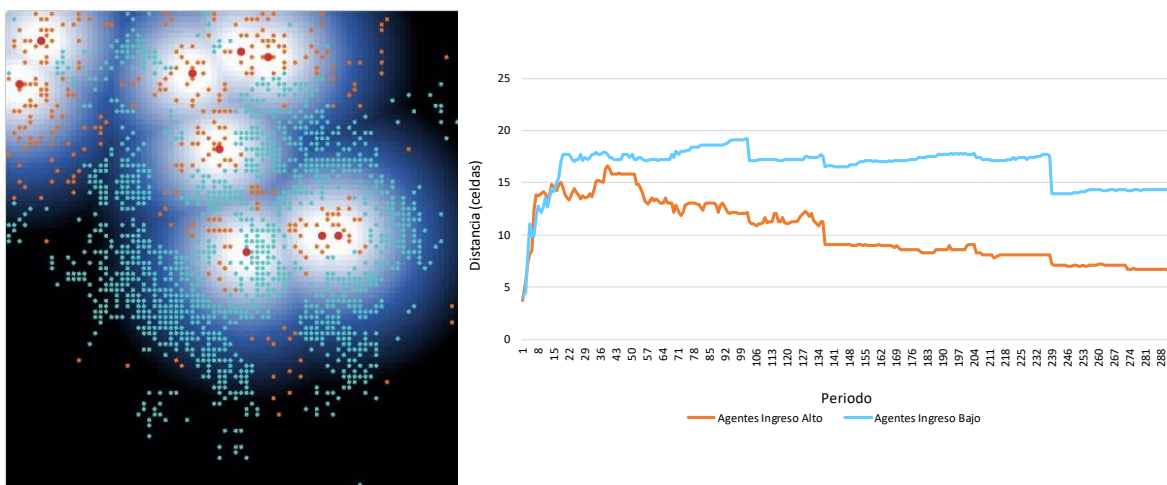
Figura 3. Resultados de la simulación en distancia a centros de trabajo.



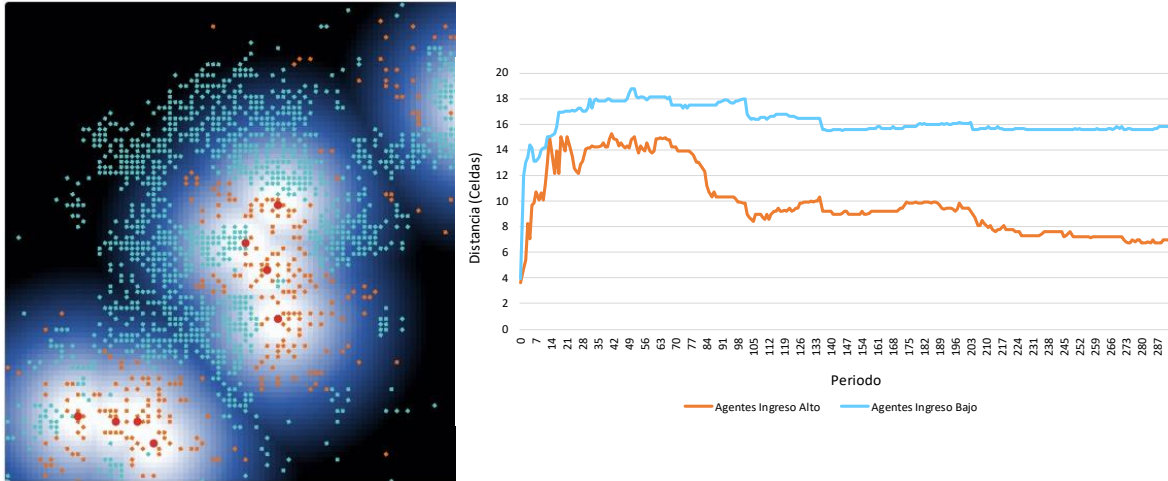
a) Primer escenario – Visualización de aglomeración y Distancia al sitio de trabajo más cercano



b) Segundo escenario – Visualización de aglomeración y Distancia al sitio de trabajo más cercano



c) Tercer escenario – Visualización de aglomeración y Distancia al sitio de trabajo más cercano



d) Cuarto escenario – Visualización de aglomeración y Distancia al sitio de trabajo más cercano

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, como se mencionó anteriormente, fue posible dar cuenta de la progresiva reducción de la distancia existente entre las viviendas de los individuos, sin importar su nivel de ingresos. Ahora bien, aunque lo anterior es cierto, es necesario resaltar que la distancia que los agentes de ingreso alto tuvieron que recorrer hasta los sitios de empleo casi siempre fue menor a la de los otros agentes.

5. Identificación de los determinantes de la estructura urbana

De acuerdo con los resultados del estudio de Avendaño (2008) y de aquellos del modelo simulado en la sección anterior, se puede afirmar que Bogotá es una ciudad que cuenta con más de un centro económico. Ahora bien, es necesario profundizar sobre los elementos que condicionan la aparición de subcentros económicos y que alteran la morfología urbana. Para tal efecto, se plantea un segundo modelo sencillo en que existen al menos dos centros económicos (el distrito central de negocios y un subcentro) teniendo como referencia los trabajos de Lemoy, Raux y Jensen (2016) y de Ayaragarnchanakul (2014).

En el modelo propuesto el centro distrital de negocios reúne tres actividades económicas distintas: manufactura, retail y oficinas. Adicionalmente, existen dos tipos de bienes: hay un bien de manufactura que se vende a un precio dado en el mercado y un numerario, que se importa y vende en las firmas de retail, de manera que los trabajadores en este sector provienen de fuera de la ciudad. Así las cosas, los trabajadores de la ciudad trabajan en empresas manufactureras o en oficinas. Los ingresos de las firmas vuelven a los hogares mediante los salarios pagados.

Cada hogar tiene un trabajador que se desplaza a laborar al centro distrital de negocios (CDN) y compra del bien numerario. Ahora bien, hay trabajadores calificados y no calificados que viven en el área que rodea a los centros económicos, y hacen la misma cantidad de viajes a sitios de trabajo al año. Las horas de trabajo son fijas. Los hogares cuentan con una misma dotación inicial, pero cuentan con ingresos distintos, los cuales vienen dados por una distribución gamma (la razón para elegir esta distribución de los ingresos radica en dar cuenta de la desigualdad económica y el sesgo asociado). Los trabajadores calificados tienen ingresos de hasta un 1% adicional cada año y los no calificados la mitad de este. Los hogares deben elegir sus ubicaciones para vivienda (x_h) y trabajo (x_w). Dado que el sitio de trabajo de cada trabajador es fijo, estos sólo deben considerar la ubicación de la vivienda.

Cada parcela de tierra tiene un precio mínimo correspondiente a la renta agrícola (R_a), la cual se asigna de forma diferenciada según el uso de la tierra, solo si no se encuentra ya ocupada por hogares o empresas. La renta de la tierra se paga a extranjeros tal que no hay un impacto en la economía local.

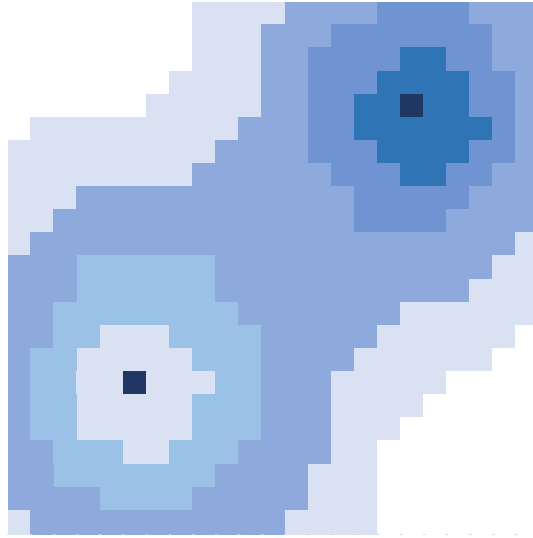
Dado lo anterior, el modelo basado en agentes se resume en tres elementos principales: ambiente, reglas de comportamiento y características del agente, los cuales de nuevo serán calibrados en NetLogo.

5.1 Ambiente inicial del modelo

Siguiendo las condiciones con que se desarrolló el modelo de referencia de Ayaragarnchanakul (2014), el espacio en el cual se desarrollará la microsimulación corresponde a una cuadrícula de 25x25 celdas, en la que se ubican dos centros de empleo; la firma de oficinas en uno de los centros y la firma manufacturera en el otro. De forma general, existen nueve tipos de uso de la tierra: sitios de manufactura, oficinas, área

urbanizada adyacente a las oficinas, área residencial adyacente a los sitios de manufactura, dos áreas de urbanizaciones externas, dos áreas de tierra con desarrollos en progreso y tierra sin desarrollar. No sobra aclarar que los primeros dos tipos de tierra y el último no son aptos para ser habitables.

Figura 4. Espacio inicial del modelo de dos centros



Fuente: Elaboración propia con base en Ayaragarnchanakul (2014)

La oscuridad en el color de las celdas (tables.

Figura 4) denota qué tan alta es la renta para cada tipo de celda, siendo las más oscuras las más elevadas, mientras que las celdas blancas corresponden a áreas sin desarrollar no aptas para ser habitadas. De lo anterior es necesario denotar que la zona hacia el noreste en torno al punto oscuro corresponde al centro que contiene las firmas de oficinas y la zona al suroeste las firmas manufactureras. La renta inicial (R_0) para cada tipo de celda se toma de una distribución normal al inicio de la calibración. La renta se actualiza con el transcurso de cada periodo ("tick") mediante un mecanismo de oferta el cual tiene por cota inferior a la renta agrícola (R_a). Para este caso, cada "tick" se cuenta como un año y en cada uno las rentas cambias dependiendo del desplazamiento de los agentes entre las celdas.

5.2 Características de los agentes y reglas de comportamiento

Los hogares tienen un ingreso definido a partir de una distribución gamma dado que esta está sesgada hacia la población de menores recursos. Los hogares se dividirán de acuerdo con el tipo de trabajadores que albergan (calificados o no calificados). Un porcentaje de los hogares se escoge aleatoriamente para ser candidatos a moverse o no de celda en cada periodo.

Como se mencionó los trabajadores eligen su consumo óptimo del numerario (z^*) y de superficie de vivienda (s^*) que maximice su utilidad log-lineal, sujeta a una restricción lineal. Los hogares eligen de acuerdo con el siguiente problema de dos periodos de maximización de consumo y ahorro:

Los hogares maximizan

$$\sum_{t=0}^T [-\beta t + \alpha \ln(z_t) + (1 - \alpha) \ln(s_t)]; \quad \alpha, \beta \in (0,1)$$

Sujeto a

$$A_{t+1} = (1 + i)[A_t - Y_t - z_t - R_t(x_h, x_w)s_t + cd_t(x_h, x_w)], \quad A_0 \text{ es dado}, \quad A_{T+1} = 0$$

Donde U es la utilidad, z el bien numerario (todos los bienes que el agente consume excepto la vivienda), s es el área destinada a vivienda, Y el ingreso del hogar, c el costo de desplazamiento por unidad de distancia, $d(x_h, x_w)$ la distancia de la residencia de cada hogar al sitio de trabajo, $R(x_h, x_w)$ el precio por unidad de tierra condicionado a su uso, A la riqueza acumulada por los hogares, i la tasa de interés, t el periodo, x_h la ubicación de la vivienda, x_w el sitio de trabajo, β el factor de descuento del consumo y α un parámetro constante.

A partir de lo anterior se obtiene lo siguiente:

$$s_t^* = \frac{1 - \alpha}{R_t(x_h, x_w)} \left[A_t + Y_t - cd_t(x_h, x_w) - \frac{A_{t+1}}{1 + i} \right]$$

Y

$$z_t^* = \alpha \left[A_t + Y_t - cd_t(x_h, x_w) - \frac{A_{t+1}}{1 + i} \right]$$

Según sea la condición de calificación del trabajador del hogar, el ajuste de ingreso mencionado previamente influenciará la optimización de su consumo de numerario y vivienda, afectando su utilidad cada periodo.

Si un hogar es escogido aleatoriamente para poder moverse en el espacio, este podrá elegir si se desplaza al sur, norte, este u oeste del espacio que actualmente ocupa. La decisión de movimiento se rige por el siguiente mecanismo de oferta:

Si se obtiene mayor utilidad por desplazarse, el espacio de destino no está muy ocupado ni es demasiado caro, se realizará una oferta de acuerdo con la fórmula de renta creciente:

$$R_{n+1,t} = R_{n,t} \left(1 + \epsilon \frac{s_{occ}}{s_{tot}} \frac{\Delta U}{U_n} \right)$$

Donde $R_{n+1,t}$ es la renta por unidad de vivienda en la celda candidata en el periodo actual, $R_{n,t}$ es la renta por unidad de vivienda en la celda actualmente ocupada, s_{occ} es la superficie de tierra ocupada por los hogares en la celda, s_{tot} el área total de la celda, ΔU es el cambio de utilidad por desplazamientos, U_n la utilidad que provee la celda actualmente ocupada y ϵ es un parámetro positivo de control de la magnitud de la oferta. Una vez realizada la oferta, todos los hogares que ocupan la celda tendrán que pagar una renta mayor, igual a la oferta ganadora del hogar que eligió desplazarse.

Como es de esperar, si la celda a la que un hogar quisiera moverse no genera una utilidad mayor por el desplazamiento, está muy ocupada o tiene una renta que no puede ser pagada, no se produce desplazamiento entre celdas. Adicionalmente, los hogares en la celda densamente ocupada o con renta elevada pueden elegir desplazarse a otras celdas, haciendo que la renta en la celda actual decrezca:

$$R_{n,t} = R_{n-1,t} - \left(R_{n-1,t} - \frac{0.9R_a s_{av}}{\theta s_{tot}} \right)$$

Donde $R_{n-1,t}$ es la renta por unidad de vivienda en la celda ocupada en el periodo pasado, R_a la renta mínima por uso de la tierra, s_{av} la superficie de tierra disponible en la celda y θ una tasa temporal decreciente. La Tabla 2 resume los parámetros de calibración empleados.

Tabla 2. Parámetros de calibración para el modelo de dos centros

Parámetro	Valor
-----------	-------

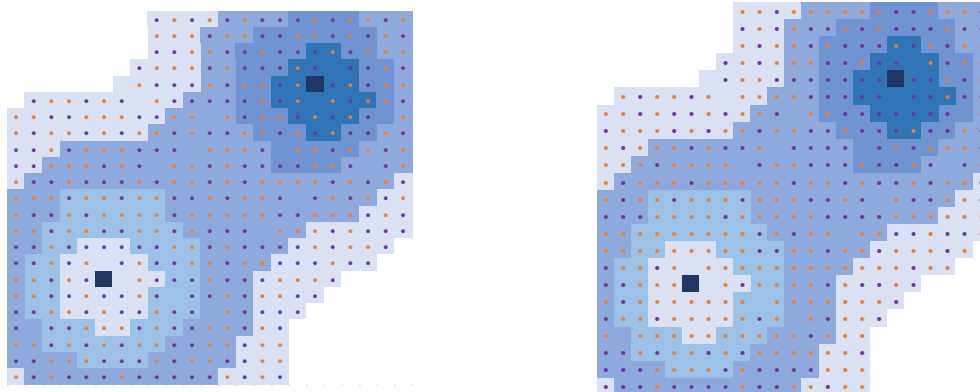
Población	1000
Porcentaje de trabajadores calificados	30%
Ingreso promedio por hogar (miles de pesos)	1500
Renta base (miles de pesos)	1200
Costo de transporte por unidad (miles de pesos)	12
Ponderaciones en la función de utilidad (a,b)	0.75, 0.25
Magnitud de la oferta (ϵ, θ)	0.1, 10
Tasa de interés	0.3
Hogares escogidos para moverse	10%

5.3 Resultados de la simulación

A partir de la dinámica del modelo y los parámetros de calibración mencionados, se llevó a cabo la simulación del modelo en cuestión. En una primera instancia los agentes se distribuyen aleatoriamente en el espacio, y su nivel de calificación se diferencia por sus colores (los trabajadores calificados son los círculos morados y los no calificados los de color naranja). Una vez situados, se procede a simular durante 75 *ticks*, los cuales corresponden a la misma cantidad de años.

Figura 5. Resultados para la distribución de agentes en los dos centros económicos

a) Configuración al inicio de la simulación b) Distribución de los agentes después de la simulación

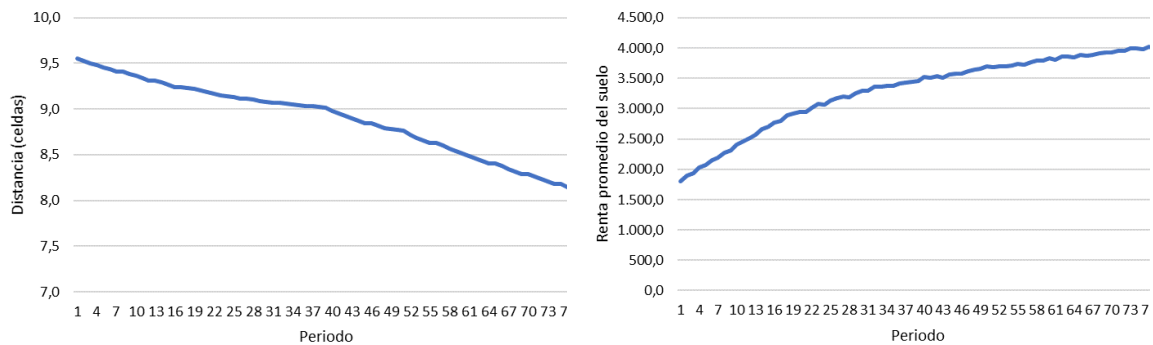


La simulación del modelo evidenció que, así como hubiera podido inferirse en primera instancia, los trabajadores no calificados se desplazaron hacia el centro manufacturero y los calificados al centro con oficinas. No obstante, un hallazgo importante radica en el hecho de que no hay una separación total de individuos; los agentes no calificados y los calificados tienden a asentarse unos junto a otros cerca de sus sitios de trabajo. Este fenómeno también era notorio en los modelos anteriormente simulados y es consistente

con lo encontrado por otros trabajos Lemoy, Raux y Jensen (2016) y Ayaragarnchanakul (2014).

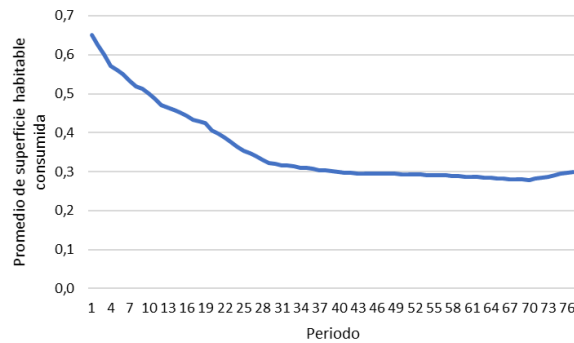
Producto del desplazamiento de los trabajadores, fue posible observar descensos en la distancia de las viviendas a los sitios de trabajo, un incremento de la renta de la vivienda, lo cual es consecuencia de la reducción de la oferta de espacios habitables cerca de los centros de referencia. Dado que la renta se eleve conforme se está más cerca de un centro económico, el ingreso disponible con que cuentan los trabajadores para pagar por espacio habitable se reduce, y por lo tanto también se reduce su consumo del área de vivienda.

Figura 6. Evolución de la distancia, renta y área habitacional promedio de los agentes



a) Distancia al centro económico (celdas)

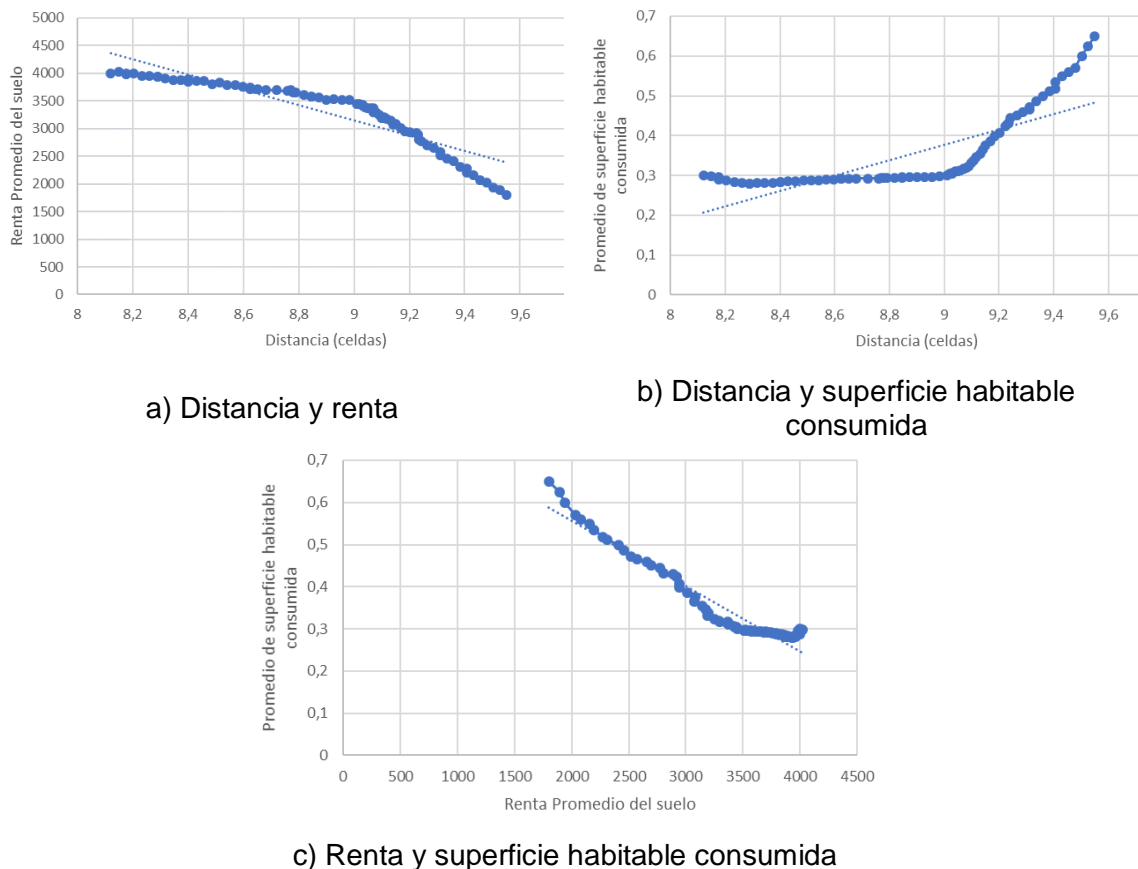
b) Renta promedio de las ubicaciones



c) Promedio de superficie habitable consumida

Fuente: Elaboración propia.

Figura 7. Relación entre distancia, renta y área habitacional de los agentes



Fuente: Elaboración propia.

Considerando el aumento de la renta por unidad habitacional y la reducción del área habitacional, el costo óptimo de la vivienda se eleva junto con el valor del bien numerario consumido por los agentes del modelo. Así como dio cuenta el trabajo de Ayaragarnchanakul (2014), existe una brecha en el consumo de los trabajadores calificados y los no calificados, dada la brecha en ingresos que diferencia a estos agentes.

6. Conclusiones

El presente trabajo construyó dos modelos computacionales para realizar un análisis a través de microsimulaciones de algunos de los factores condicionantes para la aparición de subcentros económicos en la ciudad de Bogotá. Aunque ambos modelos parten de bases distintas, estos comparten una lógica que obedece al comportamiento descentralizado de agentes y permite un análisis más flexible de la configuración

económica y morfológica de la ciudad, dejando de lado la necesidad de una convergencia hacia un determinado resultado.

El primero de los dos modelos partió de un escenario en que la urbe comenzó a desarrollarse desde la etapa caracterizada por la existencia de un único centro económico. Conforme avanzó el tiempo en dicho ejercicio, fue posible identificar una serie de hechos para las cuatro diferentes iteraciones probadas. Así como creció la Bogotá simulada y su población, las condiciones iniciales fueron determinantes para la constitución de nuevos sitios de empleo. Aunque en etapas intermedias es posible dar cuenta de un crecimiento desordenado transitorio, los individuos y los sitios de empleo son capaces de aglomerarse espacialmente. Las concentraciones espaciales dieron cuenta de la configuración de varios subcentros económicos, sino que también permitieron evidenciar que factores como el ingreso segregan espacialmente de forma significativa.

En particular, se destaca que el modelo empleado para corroborar los hallazgos de estudios como el de Avendaño (2008) para Bogotá ofrecen resultados consistentes. La cantidad de subcentros identificados coincidió con los que dicho trabajo encontró que eran significativos y presentaban los signos correctos al estimar mediante técnicas de econometría espacial. También es necesario resaltar que, aunque estos modelos guardan cercanía con cómo evolucionó Bogotá y dan cuenta de fenómenos ligados a la realidad de la capital, análisis más complejos pueden permitir dar mayor profundidad y alcance a los hallazgos aquí identificados, en especial considerando que el impulso al desarrollo de aglomeraciones en la capital no es una dinámica limitada a esta; es necesario reconocer la influencia sobre el desarrollo de los municipios conurbantes.

Por otra parte, el segundo modelo priorizó la inclusión de más variables en la dinámica de los subcentros económicos para poder dar una clara intuición sobre el funcionamiento de estos. Dado que el primer modelo validó la policentricidad de la capital colombiana, este segundo tomó un caso sencillo de dos subcentros con agentes diferenciados por ingreso, vía la calificación de la mano de obra. Reflejando la diferenciación de los usos del suelo y de las principales actividades económicas de los subcentros, en este caso fue posible encontrar que las aglomeraciones que surgen producto de un problema de maximización intertemporal de la utilidad de los individuos pueden derivar en resultados acordes a la teoría de renta ofertada, trazando un paralelo con lo sucedido con la oferta para las

viviendas. Adicionalmente, la simulación evidenció que, con el paso del tiempo y la interacción de los agentes, estos se sitúan más cerca de sus sitios de trabajo así deban pagar más por el espacio habitacional y sacrificar área de la vivienda en las ubicaciones escogidas.

Finalmente, al considerar los hallazgos de los dos modelos desarrollados aquí, es evidente que las brechas surgidas de la desigualdad en el ingreso de los agentes tienen un efecto tangible y sustancial en la configuración geográfica simulada. La introducción de innovaciones en estos esquemas tales como la posibilidad del trabajo a distancia o la descentralización misma del aparato productivo podría arrojar valiosos aportes en lo concerniente al cambio de la estructura económica urbana y la morfología de ciudades o ciudades-región como Bogotá, permitiendo así guiar políticas públicas encaminadas a la mejora de las condiciones de los ciudadanos en urbes del siglo XXI.

Bibliografía

Alonso, W. (1964). *Location and Land Use*. Cambridge: Harvard University Press.

Avendaño, A. J. (2008, Noviembre). *Identificación de subcentros de empleo y estimación de funciones de densidad para Bogotá D. C.* Retrieved from Documentos de Investigación del Programa de Doctorado de Economía Aplicada Universitat Autònoma de Barcelona: <http://dep-economia-aplicada.uab.cat/secretaria/docrecerca/aavendano.pdf>

Ayaragarnchanakul, E. (2014, Noviembre). *An agent-based model of polycentric city formation: application to the Bangkok Metropolitan Region*. Retrieved Julio 2018, from Thammasat University Digital Collections: <http://beyond.library.tu.ac.th/cdm/ref/collection/thesis/id/20542>

Berry, B. (1967). *Geography of Market Centers and Retail Distribution*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.

Bertaud, A. (2003). The Spatial Organization of Cities: Deliberate Outcome or Unforeseen Consequence? *World Development Report*, 1-28. Retrieved from <http://documents.worldbank.org/curated/en/129541468782382523/pdf/wdr27864.pdf>

Bocarejo, J. P. (2007). Elementos para la formulación de políticas en transporte y servicios públicos domiciliarios. Bogotá D.C.: Secretaría de Planeación de Bogotá.

Bocarejo, J. P., & Tafur, L. E. (2013). *Urban Land Use Transformation Driven by an Innovative Transportation Project, Bogotá, Colombia*. Retrieved from UN Habitat: https://unhabitat.org/wp-content/uploads/2013/06/GRHS.2013.Case_.Study_.Bogota.Colombia.pdf

Capello, R. (2013). Recent Theoretical Paradigms in Urban Growth. *European Planning Studies*, 21(3), 316-333.

Chauvin, J. P., Glaeser, E., Ma, Y., & Tobio, K. (2016). What Is Different About Urbanization in Rich and Poor Countries? Cities in Brazil, China, India and the United States. *NBER Working Papers*(22002), 1-62.

Clavijo, S., Janna, M., & Muñoz, S. (2004, Agosto). La vivienda en Colombia: sus determinantes socio-economicos y financieros. *Borradores de Economía*(300). Retrieved Agosto 2018, from http://repositorio.banrep.gov.co/bitstream/handle/20.500.12134/5318/be_300.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Corcoran, S. (2014). Tiebout Sorting. In D. Brewer, & L. Picus, *Encyclopedia of Education Economics & Finance* (pp. 787-788). Thousand Oaks: SAGE Publications, Inc. doi:<http://dx.doi.org/10.4135/9781483346595.n287>

Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2011, Mayo). *Indicadores demográficos según departamento 1985-2020*. Retrieved from Series de población:

<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/series-de-poblacion>

- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2015, Julio). *Encuesta multipropósito*. Retrieved from Encuesta multipropósito (EM) 2014 : <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/pobreza-y-condiciones-de-vida/encuesta-multiproposito/encuesta-multiproposito-2014>
- Fernandez-Maldonado, A., Romein, A., Verkoren, O., & Parente Paula Pessoa, R. (2014). Polycentric Structures in Latin American Metropolitan Areas: Identifying Employment Sub-centres. *Regional Studies*, 48(12), 1954-1971.
- Fontaine, C., & Rounsevell, M. (2009). An agent-based approach to model Future residential pressure on a regional landscape. *Landscape Ecology*, 24(1237). doi:<https://doi.org/10.1007/s10980-009-9378-0>
- Giuliano, G., & Small, K. (1991). Subcenters in the Los Angeles Region. *Regional Science and Urban Economics*, 21(2), 163-182.
- Glaeser, E. (2000). The New Economics of Urban and Regional Growth. In G. Clark, M. Feldman, & M. Gertler, *The Oxford Handbook of Economic Geography* (pp. 83-98). Oxford: Oxford University Press.
- Gómez-Antonio, M., Hortas-Rico, M., & Li, L. (2016). The Causes of Urban Sprawl in Spanish Urban Areas: A Spatial Approach. *Spatial Economic Analysis*, 11(2), 219-247. doi:[10.1080/17421772.2016.1126674](https://doi.org/10.1080/17421772.2016.1126674)
- Gonzales de Olarte, E., & del Pozo, J. M. (2012). Lima, una ciudad policéntrica. Un análisis a partir de la localización del empleo. *Investigaciones Regionales*(23), 29-52.
- Grover, A., & Lall, S. (2015, Octubre). Jobs and Land Use within Cities, A Survey of Theory, Evidence, and Policy. *Policy Research Working Paper Series*(7453), 1-41. Retrieved from <http://documents.worldbank.org/curated/en/124821467998516878/pdf/WPS7453.pdf>
- Heppenstall, A., Crooks, A., See, L., & Batty, M. (2012). *Agent-Based Models of Geographical Systems*. Heidelberg, Alemania: Springer. Retrieved Septiembre 2017
- Kulish, M., Richards, A., & Gillitzer, C. (2011). Urban Structure and Housing Prices: Some Evidence From Australian Cities. *Research Discussion Papers*(2011-03), 1-42.
- Lemoy, R., Raux, C., & Jensen, P. (2012). Exploring the polycentric city with multi-worker households: An agent-based microeconomic model. *Computers, Environment and Urban Systems*, 62, 64-73.
- Liu, X., Derudder, B., & Wu, K. (2016). Measuring Polycentric Urban Development in China: An Intercity Transportation Network Perspective. *Regional Studies*, 50(8). doi:[10.1080/00343404.2015.1004535](https://doi.org/10.1080/00343404.2015.1004535)

- Marshall, A. (1920). *Principles of Economics*. Londres: MacMillan.
- McMillen, D., & Smith, S. (2003). The number of subcenters in large urban areas. *Journal of Urban Economics*, 53, 321-338. doi:10.1016/S0094-1190(03)00026-3
- Meijers, E. (2007). Clones or Complements? The Division of Labour between the Main Cities of the Randstad, the Flemish Diamond, and the RheinRuhr Area. *Regional Studies*, 41(7), 889-900.
- Rossi-Hansberg, E., & Wright, M. (2005). Urban Structure and Growth. *NBER Working Paper Series*(11262), 1-39.
- Salvati, L., & Carlucci, M. (2016). Patterns of Sprawl: The Socioeconomic and Territorial Profile of Dispersed Urban Areas in Italy. *Regional Studies*, 50(8), 1346-1359. doi:10.1080/00343404.2015.1009435
- Sinclair-Smith, K. (2015). Polycentric development in the Cape Town city-region: Empirical assessment and consideration of spatial policy implications. *Development Southern Africa*, 32(2), 131-150. doi:10.1080/0376835X.2014.984378
- Wilensky, U. (1999). NetLogo. Evanston, Illinois, Estado Unidos: Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University. Retrieved from <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>
- Wilensky, U., & Felsen, M. (2007). NetLogo Urban Suite - Economic Disparity model. Evanston, Illinois, Estados Unidos: Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University. Retrieved from <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/UrbanSuite-EconomicDisparity>
- Zheng, S., Sun, W., Wu, J., & Kahn, M. (2015). The Birth of Edge Cities in China: Measuring the Spillover Effects Of Industrial Parks. *NBER Working Papers*, 21378, 1-64.